

УДК 669.15-194.56

**О. В. Маслова<sup>\*</sup>, Н. Н. Озерец, М. А. Павлов**

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

*\*olenka1709@mail.ru*

Научный руководитель — проф., д-р техн. наук В. В. Березовская

## МОДИФИЦИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВА МАРТЕНСИТНО-СТАРЕЮЩЕЙ СТАЛИ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИОНАМИ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ

Исследована мартенситно-стареющая сталь 03Н18К3М3Т после обработки по разным схемам, включающим закалку, старение и облучение ионами  $Ar^+$  с энергией 40 кэВ. Показано, что наиболее заметное улучшение свойств и изменение структуры достигается при использовании облучения на завершающем этапе обработки стали после закалки и старения.

*Ключевые слова:* мартенситно-стареющая сталь, ионное облучение, замедленное разрушение, микротвердость, дислокационная структура

**O. V. Maslova, N. N. Ozerets, M. A. Pavlov**

## MODIFICATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF MARAGING STEEL WHEN IRRADIATED BY HIGH ENERGY IONS

The work is devoted to studying the maraging steel 03Н18К3М3Т after treatment according to three schemes, including hardening, aging, and irradiation with  $Ar^+$  ions. It is shown that the most noticeable improvement in properties and structural changes is achieved by using irradiation at the final stage of steel processing after quenching and aging.

*Key words:* maraging steel, ion irradiation, delayed fracture, microhardness, dislocation structure

**М**артенситно-стареющие стали (МСС), обладающие высокими механическими и технологическими свойствами, подвержены замедленному разрушению (ЗР) в состаренном при низких температурах состоянии [1]. Одним из направлений повышения прочности

конструкционных материалов является модификация их структуры на основе современных технологий физического воздействия. Используемые для этой цели ионы с высокой энергией, которые внедряются в материал мишени на глубину около 0,011 мкм, формируя в ней особое структурное состояние, относятся к числу таких технологий [2].

В работах, выполненных в Институте электрофизики УрО РАН, показано, что облучение ионами может существенно модифицировать поверхностные и объемные свойства различных сплавов. Это касается, в частности, повышения их прочности и формирования структурных состояний, способствующих повышению сопротивления распространению трещины при одноосном растяжении [3; 4].

Цель работы состояла в изучении влияния облучения ускоренными ионами  $\text{Ag}^+$  мартенситно-стареющей стали 03 Н18 К3 М3 Т на ее сопротивление замедленному разрушению (ЗР).

Сталь 03Н18К3М3Т получали вакуумно-индукционной плавкой, после гомогенизации при 1200 °С в течение 1,5 ч слитки ковали на прутки. Режимы последующей обработки приведены в табл. Облучение образцов со стороны надреза непрерывными пучками ионов  $\text{Ag}^+$  проводили на имплантере ИЛМ-1 с ионным источником ПУЛЬСАР-1 М по методике ИЭФ. Используемые параметры облучения: энергия ионов  $E = 40$  кэВ, плотность ионного тока  $j = 200$  мкА/см<sup>2</sup>, флюенс  $F = 1,25 \cdot 10^{17}$  см<sup>-2</sup> (соответствующее время облучения 100 с),  $T = 270$  °С. Согласно расчетам, проведенным методом TRIM [5], средний проективный пробег ионов аргона в исследуемой стали составляет ~18,5 нм.

Испытания ЗР проводили по схеме чистого изгиба призматических образцов размером 55×10×11 мм с V-образным надрезом при постоянной нагрузке по методу Брауна. Средой испытания служила дистиллированная вода комнатной температуры. Относительное снижение прочности при ЗР определяли как  $\Delta\sigma = (\sigma_k - \sigma_n)/\sigma_k$ , где  $\sigma_k$  — кратковременную прочность,  $\sigma_n$  — пороговое напряжение, ниже которого разрушение не происходило в течение 100 ч.

Механические свойства стали 03Н18К3М3Т после обработок 1, 2 и 3 приведены в табл.

Облучение максимально повышает твердость, прочность и сопротивление ЗР при его использовании на завершающей стадии обработки (режим 3). Относительное снижение прочности ( $\Delta\sigma$ ) после та-

кой обработки меньше почти на 20 %. Испытания ударной вязкости положительного эффекта воздействия облучения не обнаружили, что связано с недостаточностью времени для проявления охрупчивающих процессов, происходящих обычно при ЗР МСС.

Таблица

Механические свойства исследованной стали

№	Режим обработки	HV <sub>0,05</sub>	σ <sub>к</sub>	σ <sub>п</sub>	Δσ, %	KCV, МДж/м <sup>2</sup>
			МПа			
1	Закалка, 820 °С + старение, 400 °С, 3 ч	500	1320	120	91	0,56
2	Закалка, 820 °С + облучение Ar <sup>+</sup> + старение, 400 °С, 3 ч	580	1570	350	78	0,56
3	Закалка, 820 °С + старение, 400 °С, 3 ч + облучение Ar <sup>+</sup>	625	1900	570	70	0,58

При облучении наблюдалось измельчение микроструктуры мартенсита (см. рис.), вызванное процессами динамической рекристаллизации мартенсита под действием нагрева (270 °С) образцов. О деформационных эффектах свидетельствовало измельчение областей когерентного рассеяния в мартенситах: 94 — в необлученном состоянии, 65 нм — после облучения.

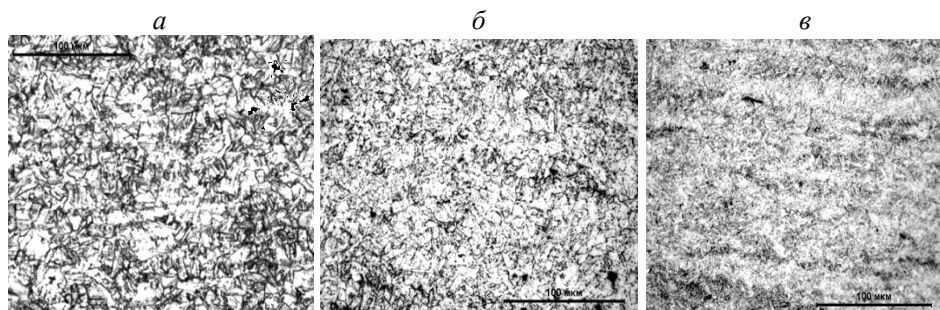


Рис. Микроструктура стали в объеме образца после обработки:

*a* — по режиму 1; *b* — по режиму 2; *v* — по режиму 3

Таким образом, упрочнение стали 03Н18К3М3Т при облучении ионами Ag<sup>+</sup> с энергией 40 кэВ обусловлено в основном измельчением структуры мартенсита.

*Авторы выражают благодарность В. В. Овчинникову  
и Н. В. Гущиной за помощь в проведении эксперимента  
и обсуждение полученных результатов.*

### **Литература**

1. Березовская В. В. Структура и замедленное разрушение мартенситно-стареющих сталей. Saarbrücken : Palmarium Academic Publishing, 2013. 222 с.
2. Комаров Ф. Ф. Ионная имплантация в металлы. М. : Металлургия, 1990. 216 с.
3. Радиационный отжиг полос алюминиевых сплавов АМг6, 1441 и ВД1 с использованием ленточного источника ускоренных ионов / В. В. Овчинников [и др.] // Металлы. 2010. № 2. С. 62–69.
4. Ovchinnikov V. V. Nanoscale dynamic effects under cascade-forming irradiation // Surface and Coating Technology. 2018. V. 355. P. 65–83.
5. Biersack J. P., Haggmark L. G. A Monte Carlo computer program for the transport of energetic ions in amorphous targets // Nucl. Instrum. and Methods. 1980. V. 174. P. 257–269.